

Q77860
Hirosi TSUDA
"OPTICAL FIBER STRAIN
filed 11/21/03
Tel 202.293.7060
Sughrue, Mion PLLC

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 2002年11月25日
Date of Application:

出願番号 特願2002-340197
Application Number:

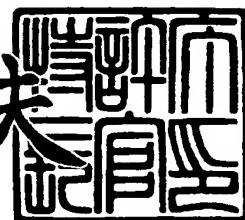
[ST. 10/C] : [JP2002-340197]

出願人 独立行政法人産業技術総合研究所
Applicant(s):

2003年10月17日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



【書類名】 特許願
【整理番号】 232-02514
【あて先】 特許庁長官 殿
【国際特許分類】 G01L 1/24
【発明者】
【住所又は居所】 茨城県つくば市東1-1-1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター内
【氏名】 津田 浩
【特許出願人】
【識別番号】 301021533
【氏名又は名称】 独立行政法人産業技術総合研究所
【代表者】 吉川 弘之
【電話番号】 0298-61-3280
【提出物件の目録】
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光ファイバひずみセンサ装置及びひずみの検出方法

【特許請求の範囲】

【請求項1】 FBGを書き込んだ光ファイバから成り被検体に取り付けられるFBGセンサと、該FBGセンサに広帯域波長光を入射するための広帯域光源と、上記FBGセンサで反射される反射光を反射又は透過させるフィルタとを備えており、

上記広帯域光源から入射され上記FBGセンサで反射される反射光の中心波長の変化を上記フィルタで処理して検出することを特徴とする光ファイバひずみセンサ装置。

【請求項2】 被検体に取り付けられるFBGセンサと、該FBGセンサに広帯域波長光を入射するための広帯域光源と、上記FBGセンサで反射される反射光を反射又は透過させるフィルタとを備えており、

上記広帯域光源から入射され上記FBGセンサで反射される反射光であって、上記フィルタによる反射光又は上記フィルタの透過光の位相を反転させて加算する処理を行って得られた信号の振幅変化により上記FBGセンサの反射光の波長変化乃至FBGセンサが受けたひずみ変化を検出することを特徴とする光ファイバひずみセンサ装置。

【請求項3】 上記FBGセンサと上記広帯域光源は光サーチュレータを介して接続されており、上記FBGセンサと上記フィルタは上記光サーチュレータを介して接続されていることを特徴とする請求項1記載の光ファイバひずみセンサ装置。

【請求項4】 上記FBGセンサと広帯域光源は第1の光サーチュレータを介して接続されており、上記FBGセンサと上記フィルタは第2の光サーチュレータを介して接続されてていることを特徴とする請求項1記載の光ファイバひずみセンサ装置。

【請求項5】 上記フィルタは、FBGフィルタ又は誘電体多層膜フィルタであることを特徴とする請求項1、2、3又は4記載の光ファイバひずみセンサ装置。

【請求項 6】 FBGを書き込んだ光ファイバから成るFBGセンサを被検体に取り付け、該FBGセンサに広帯域波長光を入射し、該FBGの反射光をフィルタに入射させて、該FBGセンサからの反射光の中心波長はFBGセンサが受けるひずみに比例して変化することを利用し、上記反射光をフィルタで処理しFBGセンサが受けるひずみ変化を検出することを特徴とする光ファイバひずみセンサを用いたひずみ検出方法。

【請求項 7】 FBGを書き込んだ光ファイバから成るFBGセンサを被検体に取り付け、該FBGセンサに広帯域波長光を入射し、該FBGの反射光をフィルタに入射させて、該FBGの反射光の波長変化に対して、フィルタの反射光と透過光は逆位相で変化することを利用し、フィルタからの反射光、透過光のいずれかの位相を反転させて加算し、FBGセンサが受けるひずみ変化を検出することを特徴とする光ファイバひずみセンサを用いたひずみ検出方法。

【請求項 8】 上記フィルタの反射率が変化するように、広帯域波長光の波長帯域を変化させることにより、微小なひずみ変化をともなう弾性波放出の検出から大きなひずみ変化が生じる衝撃負荷の検出まで行うことなどを特徴とする請求項 6 又は 7 記載の光ファイバひずみセンサを用いたひずみ検出方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明はファイバ・ブラング・グレーティング（以下「FBG」という。）センサを用いてひずみ変化を検出するための方法に関するものであり、より詳細には、材料・構造体の微視損傷発生にともなう弾性波放出（アコースティック・エミッション。以下、「AE」という。）を検出するものである。

【0002】

そしてこの発明は、圧電素子を用いて弾性波を発生させ構造体の健全性評価を行う際のAEをする際に、また衝撃負荷による高速なひずみ変化を検出する際に適用することができる。本発明は、自動車、航空機、橋梁、建築物などの健全性評価への利用が期待されるものである。

【0003】

【従来の技術】

従来、AEの検出には圧電素子を用いて、衝撃負荷の検出にはひずみゲージを用いて計測される技術が用いられている。

【0004】

又、FBGセンサからの反射波をFBGセンサのプラック波長とほぼ等しいプラック波長を有するFBGに通して、その透過光からAEを検出する手法が米国で提案されている（非特許文献1参照）。

【0005】

さらに、FBGセンサのプラック波長変化に関しては従来、光スペクトルアナライザを用いて計測されてきた。

【0006】**【非特許文献1】**

I. Perez, H.-L. Cui and E. Udd, 2001 SPIE, Vol. 4328, p.209-21

5

【0007】**【発明が解決しようとする課題】**

しかしながら、従来のAEの検出に圧電素子を用いる技術は、計測パラメータが直接電気信号に変換されて計測するため、電磁波障害の影響を受ける欠点があった。

【0008】

又、FBGセンサは計測パラメータを光信号に変換するため電磁波障害を受けないが、検出された波形はかならずしもAEの原波形を再現することができず、波形にひずみが現れる場合がある。

【0009】

さらに、FBGセンサのプラック波長変化を光スペクトルアナライザを用いて計測する技術は、光スペクトルアナライザのサンプリング速度は通常、毎秒1サンプリング程度である。このため高速のひずみ変化を追隨して検出することはできないという問題がある。

【0010】

本発明は、このような従来の問題点を解決することを目的とするものであり、次のような特徴を備えた光ファイバひずみセンサを実現することを課題とする。

(1) AEや衝撃負荷による高速なひずみ変化をFBGセンサで検出する際に正確にひずみ変化を検出することができる

(2) フィルタの反射特性を変えることにより、FBGセンサー一本で微小なひずみ変化であるAEから大きなひずみ変化が生じる衝撃負荷までの幅広いひずみ変化を検出することができる。

(3) FBGセンサは計測パラメータを光信号に変換するため電磁波障害を受けない。

【0011】

【課題を解決するための手段】

本発明は上記課題を解決するために、FBGを書き込んだ光ファイバから成り被検体に取り付けられるFBGセンサと、該FBGセンサに広帯域波長光を入射するための広帯域光源と、上記FBGセンサで反射される反射光を反射又は透過させるフィルタとを備えており、上記広帯域光源から入射され上記FBGセンサで反射される反射光の中心波長の変化を上記フィルタで処理して検出することを特徴とする光ファイバひずみセンサ装置を提供する。

【0012】

本発明は上記課題を解決するために、被検体に取り付けられるFBGセンサと、該FBGセンサに広帯域波長光を入射するための広帯域光源と、上記FBGセンサで反射される反射光を反射又は透過させるフィルタとを備えており、上記広帯域光源から入射され上記FBGセンサで反射される反射光であって、上記フィルタによる反射光又は上記フィルタの透過光の位相を反転させて加算する処理を行って得られた信号の振幅変化により上記FBGセンサの反射光の波長変化乃至FBGセンサが受けたひずみ変化を検出することを特徴とする光ファイバひずみセンサ装置を提供する。

【0013】

上記FBGセンサと上記広帯域光源は光サーチュレータを介して接続されており、上記FBGセンサと上記フィルタは上記光サーチュレータを介して接続されてい

ることを特徴とする。

【0014】

上記FBGセンサと広帯域光源は第1の光サーチュレータを介して接続されており、上記FBGセンサと上記フィルタは第2の光サーチュレータを介して接続されてていることを特徴とする。

【0015】

上記フィルタは、FBGフィルタ又は誘電体多層膜フィルタであることを特徴とする。

【0016】

本発明は上記課題を解決するために、FBGを書き込んだ光ファイバから成るFBGセンサを被検体に取り付け、該FBGセンサに広帯域波長光を入射し、該FBGの反射光をフィルタに入射させて、該FBGセンサからの反射光の中心波長はFBGセンサが受けるひずみに比例して変化することを利用し、上記反射光をフィルタで処理しFBGセンサが受けるひずみ変化を検出することを特徴とする光ファイバひずみセンサを用いたひずみ検出方法。

【0017】

本発明は上記課題を解決するために、FBGを書き込んだ光ファイバから成るFBGセンサを被検体に取り付け、該FBGセンサに広帯域波長光を入射し、該FBGの反射光をフィルタに入射させて、該FBGの反射光の波長変化に対して、フィルタの反射光と透過光は逆位相で変化することを利用し、フィルタからの反射光、透過光のいずれかの位相を反転させて加算し、FBGセンサが受けるひずみ変化を検出することを特徴とする光ファイバひずみセンサを用いたひずみ検出方法。

【0018】

上記フィルタの反射率が変化するように、広帯域波長光の波長帯域を変化させることにより、微小なひずみ変化をともなう弾性波放出の検出から大きなひずみ変化が生じる衝撃負荷の検出まで行うこととを特徴とする。

【0019】

【発明の実施の形態】

本発明に係る光ファイバひずみセンサ装置の実施の形態を実施例に基づいて図

面を参照して以下説明する。

【0020】

(FBGの動作原理)

図1によりFBGの動作原理を説明する。FBGは光ファイバの中心部(コア)の屈折率を周期的に変化させた構造を取り、屈折率と屈折率変化の間隔の積の二倍を中心波長(「プラック波長」と呼ぶ。)とする狭帯域の光信号のみを反射する。

【0021】

図1に示すように、FBGに広帯域光を入射すると、FBGの透過光はプラック波長帯域が欠けた強度分布を取る。またFBGの反射光は、プラック波長を中心とする狭帯域の光強度分布をとる。図1中の光サーチュレータ4は、端子1からの光を端子2にのみ送り、端子2からの光を端子3にのみ送りこむような光学素子である。

【0022】

FBGがひずみと温度変化を受けたとき、プラック波長は変化する。具体的には、温度を一定にした場合、図2に示すようにFBGが引張りひずみを受けるとプラック波長は増加し、圧縮ひずみを受けるとプラック波長は減少する。

【0023】

(実施例)

図3は、本発明に係る光ファイバひずみセンサ装置の構成及びそれを利用したひずみ変化の検出方法を説明する図である。

【0024】

本発明に係る光ファイバひずみセンサ装置5では、FBGセンサ6、第1の光サーチュレータ7、第2の光サーチュレータ8及びFBGフィルタ9が、光ファイバ10を介して接続されている。FBGセンサ6は、被検体に取り付けられるように構成されている。フィルタは、FBGフィルタ9の代わりに、誘電体多層膜フィルタでもよい。

【0025】

そして、第1の光サーチュレータ7には光ファイバを介して広帯域光源11に接続されている。第1の光サーチュレータ7には光ファイバ10を介して第1の

光電変換器12が接続されている。FBGフィルタ9には第2の光電変換器13が接続されている。

【0026】

図3に示すように、広帯域光源11からの光を第1の光サーキュレータ7を介して、被検体に取り付けられたFBGセンサ6に送る。FBGセンサ6からの反射光は第1の光サーキュレータ7を介して、第2の光サーキュレータ8に入射される。そしてFBGフィルタ9に入射する。FBGフィルタ9に入射した光を、透過光と、第1及び第2の光サーキュレータ7、8を介して得られる反射光との二つの光信号として第1及び第2の光電変換器12、13により電気信号に変換する。

【0027】

第1の光電変換器12の出力とFBGセンサ6が受けるひずみとの関係を図4において説明する。図4 (a) にFBGセンサ6、及びフィルタの反射特性をそれぞれ実線、及び点線で表す。ひずみなしの場合におけるFBGセンサ6のプラッグ波長を λ_S とする。FBGセンサ6からの反射光の強度分布は図4 (a) の中央図の実線で囲まれる領域で表される。

【0028】

この強度分布を有する光がFBGフィルタ9に入射される。FBGフィルタ9は点線で表される反射特性を有することから、FBGフィルタ9からの反射光強度を検出する第1の光電変換器12の出力は実線と点線で囲まれる領域が重なり合う領域(斜線領域)の面積に比例することになる。

【0029】

FBGセンサ6が圧縮ひずみを受けると、FBGセンサ6のプラッグ波長が減少して λ_S' ($< \lambda_S$)になる。一方、FBGフィルタ9のプラッグ波長 λ_F は変化しないため、両者の反射特性が重なり合う面積は増加する。したがって第1の光電変換器12の出力はひずみなしの場合と比較すると高くなる。一方、FBGセンサ6が引張りひずみを受けた場合、FBGセンサ6のプラッグ波長が増加して λ_S'' ($> \lambda_S$)になる。

【0030】

この場合、両者の反射特性が重なり合う面積は減少し、第1の光電変換器12

の出力は低下することになる。第1の光電変換器12の出力はひずみなしの状態を基準として考えるとFBGセンサ6に圧縮ひずみがかかると出力は増加、引張りひずみがかかると出力は低下することになる。

【0031】

FBGフィルタ9の透過率は透過率=1-反射率で与えられる。センサが受けるひずみ変化に対するセンサの反射、及びフィルタの透過特性を図4 (b) に示す。上記した考え方からFBGフィルタ9の透過光強度を検出する第2の光電変換器13の出力は圧縮ひずみ時は低下、引張りひずみ時は増加することになる。

【0032】

しかし、実際のFBGの反射特性は、図4 (a)、(b) に示したような単純な形とは異なり、実際は図6のような反射特性を示す。このように複雑な反射特性のため、たとえば引張りひずみが増加した場合においても必ずしもFBGフィルタ9の反射光強度を検出する第1の光電変換器12の出力が単調に増加するとは限らない。また第2の光電変換器13の場合においても同様のことが言える。つまり第2の光電変換器13の出力はFBGセンサ6が受けるひずみ変化に対して非線形変化を取る。

【0033】

しかしFBGフィルタ9の透過光、反射光強度はFBGセンサ6が受けるひずみ変化に対して、お互いに逆位相の関係があること、また反射率=1-透過率の関係から、透過光、または反射光いずれかの位相を反転して加算して得られる信号はFBGセンサ6が受けるひずみ変化に対して線形変化すると考えられる。

【0034】

(実験例)

本発明に係る光ファイバひずみセンサ装置5及びそれを利用したひずみ検出方法の作用を説明するために、そしてその効果を実証するために、以下、本発明の実験例を説明する。

【0035】

図5に示す計測装置14は、図3に示す本発明に係る光ファイバひずみセンサ装置5を基本構成とし、被検体15に振動を付与する構成として、信号発生器1

6、信号増幅器17及びAE発振子（圧電素子）18を付設し、さらに第1及び第2の光電変換器12、13の信号SR、STを計測し表示する手段としてオシロスコープ19が設けられて成るものである。この計測装置14を用いて本発明に係る光ファイバひずみセンサ装置5及びそれを利用したひずみ検出方法を実証する実験を行った。

【0036】

この実験では、信号発生器16から180kHzを中心周波数とするトーン・バースト信号を発生させ、信号増幅器17（利得=40dB）で増幅した信号を共振周波数180kHzのAE発振子18に印加した。FBGセンサ6は、被検体15にひずみゲージセメントを用いて接着させた。そして、AE発振子18を用いて被検体15に高速なひずみ変化を与えるとともに、波長帯域1520～1620nmを有する広帯域光源11からの光を第1の光サーキュレータ7を介して、FBGセンサ6に入射した。

【0037】

このようにしてFBGセンサ6でそのひずみ変化を検出した。AE発振子18が与える高速なひずみ変化は、材料の微視破壊時に生じる弾性波放出（AE）と同レベルの周波数、ひずみを有することから、AEを計測していることと同じことになる。

【0038】

FBGセンサ6からの反射光は第1の光サーキュレータ7を介して、第2の光サーキュレータ8に入射される。そしてFBGフィルタ9に入射して、FBGフィルタ9の透過光及び反射光は、それぞれ第2の光電変換器13及び第1の光電変換器12で検出される。第1及び第2の光電変換器12、13で電気信号に変換された信号SR、STをオシロスコープで計測した。

【0039】

この実験で用いたFBGセンサ6とFBGフィルタ9の反射特性を図6に示す。FBGセンサ6、及びFBGフィルタ9は、それぞれ1550.33、及び1550.18nmのプラック波長を有する。

【0040】

（実験結果その1：波形再現性）

図7に、①AE発振子18に送られた信号、②第1及び第2の光電変換器12、13からの信号SR、ST、③信号処理された信号(SR-ST)の4つを示す。第1及び第2の光電変換器12、13からの信号SR、STは、互いに逆位相の関係になっている。しかしひずみがない場合を基準レベルとして考えたとき、引張、圧縮ひずみを受けて変動する出力レベルは対称ではなく、AE発振子18に送った信号とは異なる波形となった。

【0041】

これはFBGセンサ6、及びフィルタの反射特性の複雑な形状が起因している。しかしながら信号STを逆位相にして信号SRと加算することにより（実際には両者の差を取る）得られる信号は、AE発振子18に送られた信号と同じ形状の波形を取った。

【0042】

（実験結果その2：周波数解析）

図7に示した信号の周波数成分強度解析を行った結果を図8に示す。AE発振子18への入力信号は180kHzを中心周波数とする信号である。第1及び第2の光電変換器からの信号SR及び信号STは低周波成分にも高い強度が現れ、送信信号とは異なる周波数成分強度分布を有した。一方、信号処理された信号は送信信号と一致する周波数成分強度を取った。

【0043】

（実験結果その3：AEに対するFBGセンサ6と圧電センサと応答の比較）

圧電センサは、従来、AE計測に多用されてきたセンサである。そこでAEに対するFBGセンサ6と市販されている圧電センサとの応答の比較を行った。その結果、図9に示すように信号処理されて得られたFBGセンサ6からの信号と圧電素子センサから得られた信号は同じ挙動を示した。

【0044】

この信号処理を施すことにより従来からAE計測に多用されている圧電素子と同様にAEセンサとしてFBGセンサ6を利用できることが実証された。また図9に示した信号の周波数成分強度解析を行った結果を図10に示す。FBGセンサ6と圧電素子センサから検出された信号は同様の特性を有した。

【0045】

以上の実験により、本発明は次のような作用効果を生じることが実証された。圧電素子から発振されたトーン・バースト波形のAEをFBGセンサ6でとらえ、フィルタとしてFBGフィルタ9を用いて本提案による信号処理を行った。FBGフィルタ9の透過波と反射波の波形はAEの原波形を再現することはできない。しかし本提案による信号処理された波形はAEの原波形を再現することができた。

【0046】

またFBGフィルタ9からの反射波、及び透過波の周波数成分強度を解析すると原波形とは特徴が異なる周波数成分強度分布を有した。一方、信号処理された波形は原波形の周波数成分強度分布と良く一致する結果を得た。

【0047】

またAEを検出するために従来から多用されている市販の圧電素子センサのAE検出波形との比較を行った。その結果、FBGセンサ6からの反射波を信号処理した波形は圧電素子センサから得られた波形と同様の挙動を示し、また周波数成分強度解析結果も両者が良く一致する結果を示した。

【0048】

以上、実施例により本発明に係る光ファイバひずみセンサ装置及びひずみの検出方法の実施の形態を実施例に基づいて説明したが、このような実施例に限定されることなく、特許請求の範囲記載の技術的事項の範囲内でいろいろ実施例があることは言うまでもない。

【0049】

【発明の効果】

以上の構成から成る本発明に係る光ファイバひずみセンサ装置によると、FBGセンサを用いてAEを検出することができる。フィルタの透過波のみを用いてAEを計測する手法と比較して、本手法はより正確なAE計測を可能にする。またこの手法は衝撃負荷による高速なひずみ変化の検出においても有効である。

【図面の簡単な説明】

【図1】

FBGの原理図を説明する図である。

【図2】

プラグ波長とひずみとの関係を説明する図である。

【図3】

FBGセンサを用いたひずみ変化検出システムを説明する図である。

【図4】

FBGセンサを用いたひずみ変化検出の原理図を説明する図である。

【図5】

実証試験システムを説明する図である。

【図6】

FBGセンサとフィルタの反射特性を説明する図である。

【図7】

FBGセンサにより検出されたAE波形を示す図である。

【図8】

FBGセンサが検出した信号の周波数成分強度を示す図である。

【図9】

AEに対するFBG、及び圧電センサの応答の比較を示す図である。

【図10】

FBG、及び圧電センサ信号の周波数成分強度を示す図である。

【符号の説明】

1、2、3 第1の光サーキュレータの端子

4 光サーキュレータ

5 光ファイバひずみセンサ装置

6 FBGセンサ

7 第1の光サーキュレータ

8 第2の光サーキュレータ

9 FBGフィルタ

10 光ファイバ

11 広帯域光源

12 第1の光電変換器

1 3 第2の光電変換器

1 4 計測装置

1 5 被検体

1 6 信号発生器

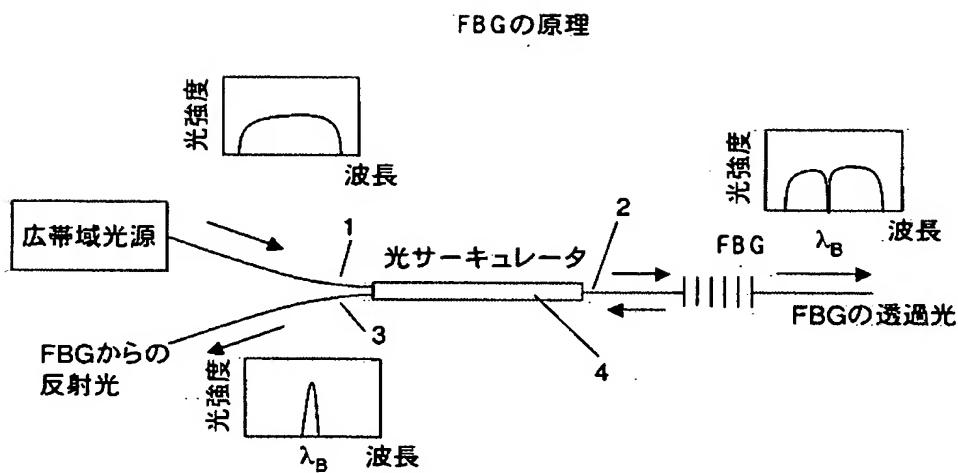
1 7 信号増幅器

1 8 AE発振子（圧電素子）

1 9 オシロスコープ

【書類名】 図面

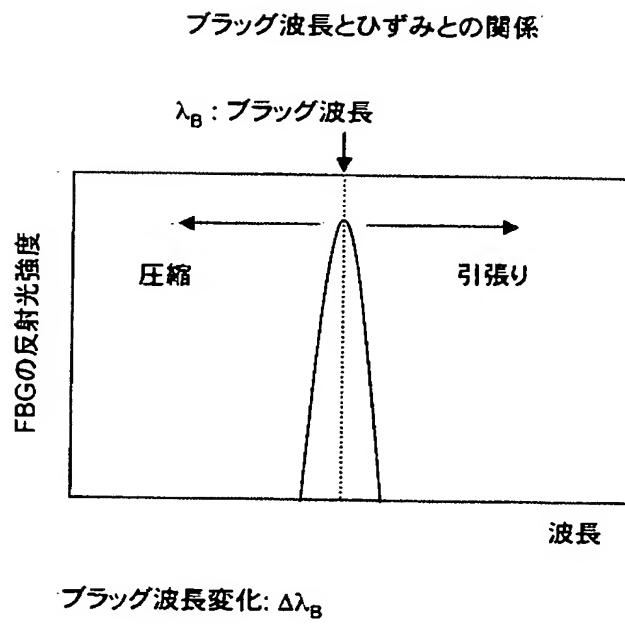
【図1】



FBGは光ファイバのコアの屈折率を周期的に変化させた構造を取る。
次式で与えられる波長を中心とした光を反射する。

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad \text{ここで } n: \text{光ファイバの屈折率} \\ \Lambda: \text{屈折率変化の間隔}$$

【図2】



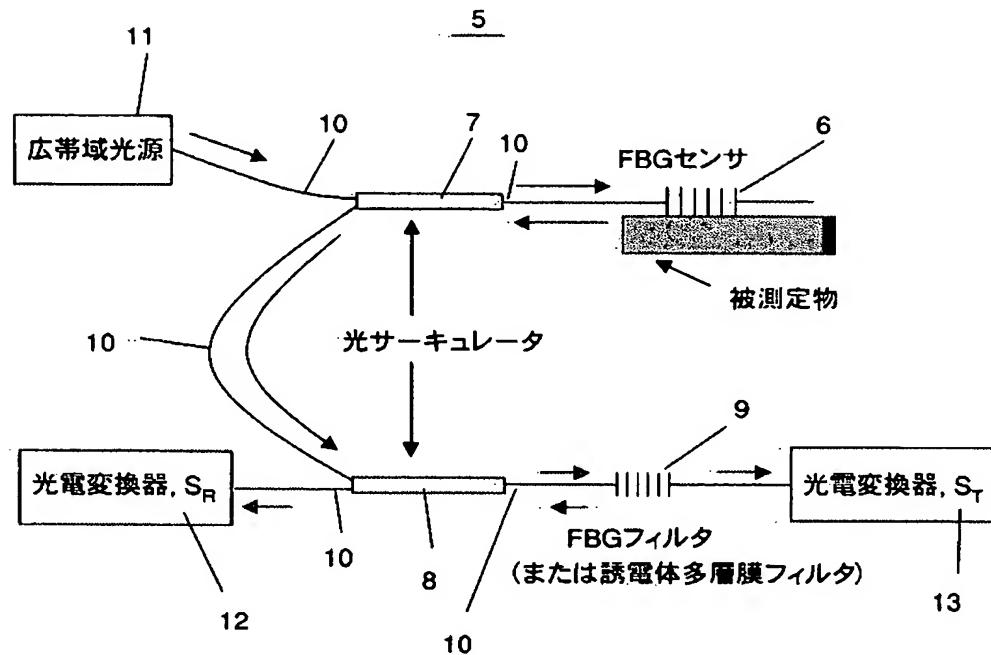
プラック波長変化: $\Delta\lambda_B$

$$\Delta\lambda_B = (1 - p_e) \lambda_B \epsilon \quad \text{一定温度条件下}$$

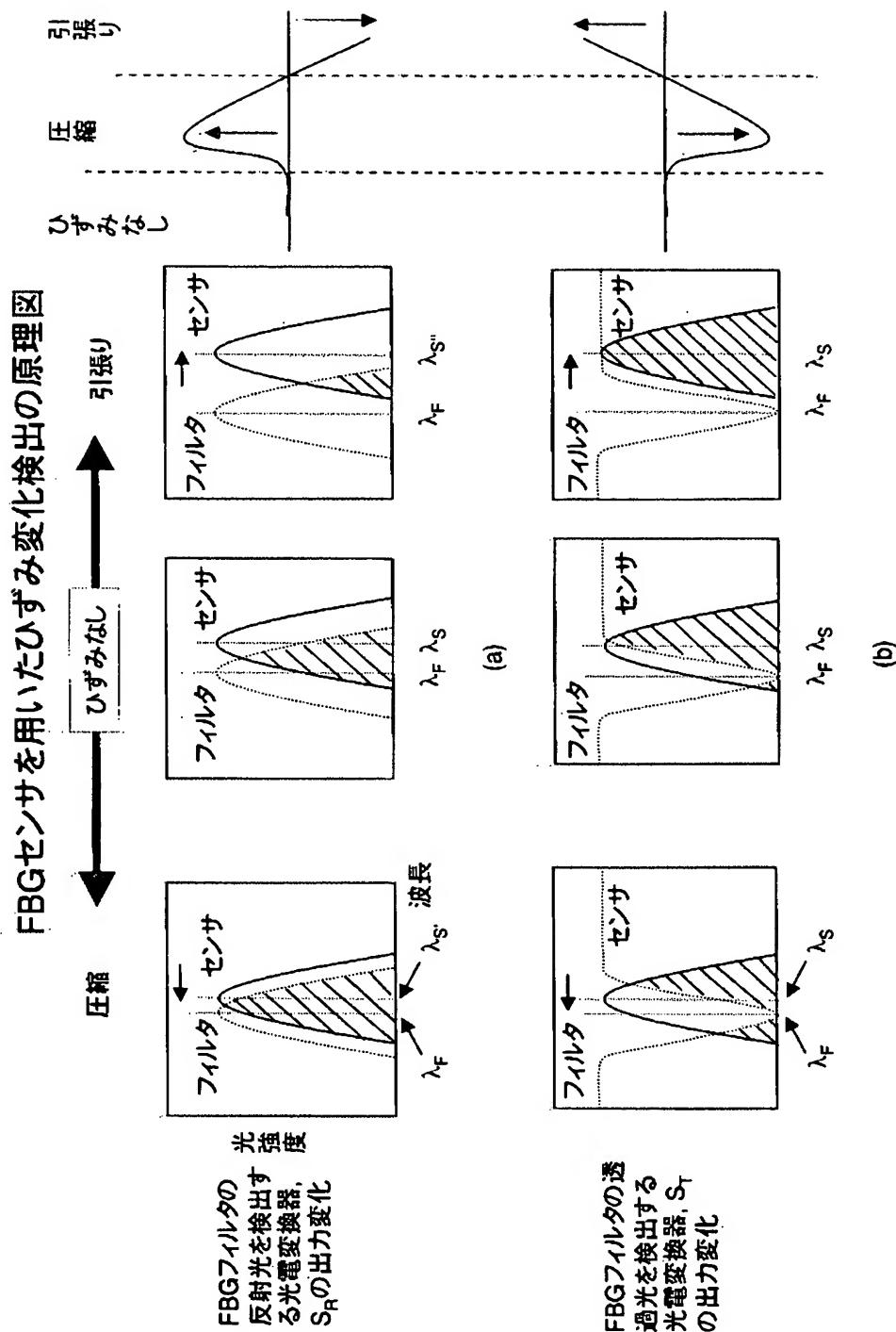
ここで p_e : 光弾性定数 (= 0.213)
 ϵ : FBGが受ける光ファイバ軸方向ひずみ
 たとえば $\lambda_B = 1550\text{nm}$ のとき、
 $1\mu\epsilon$ のひずみで 1.2pm プラック波長が変化する。

【図3】

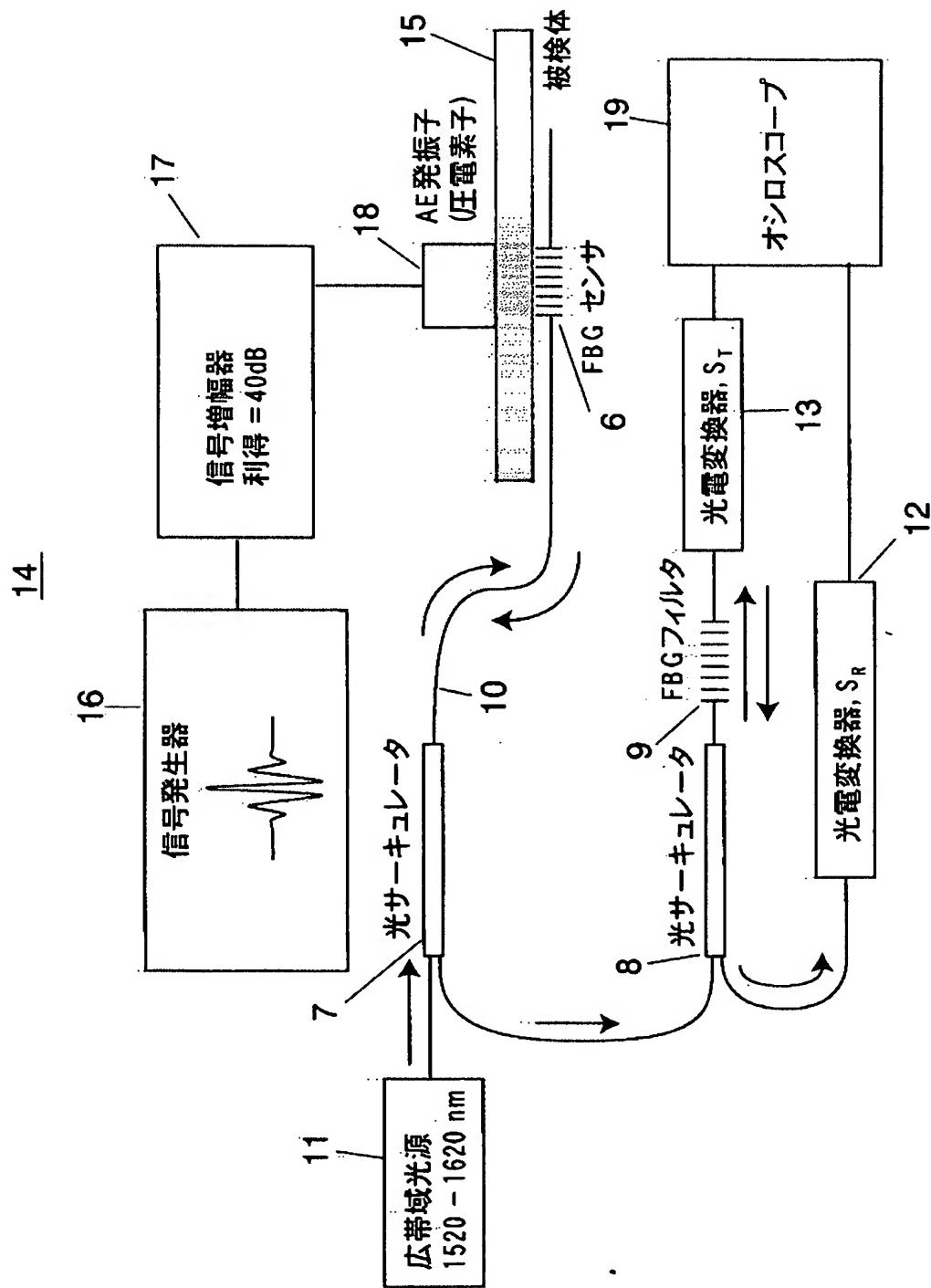
FBGセンサを用いたひずみ変化検出システム図



【図 4】

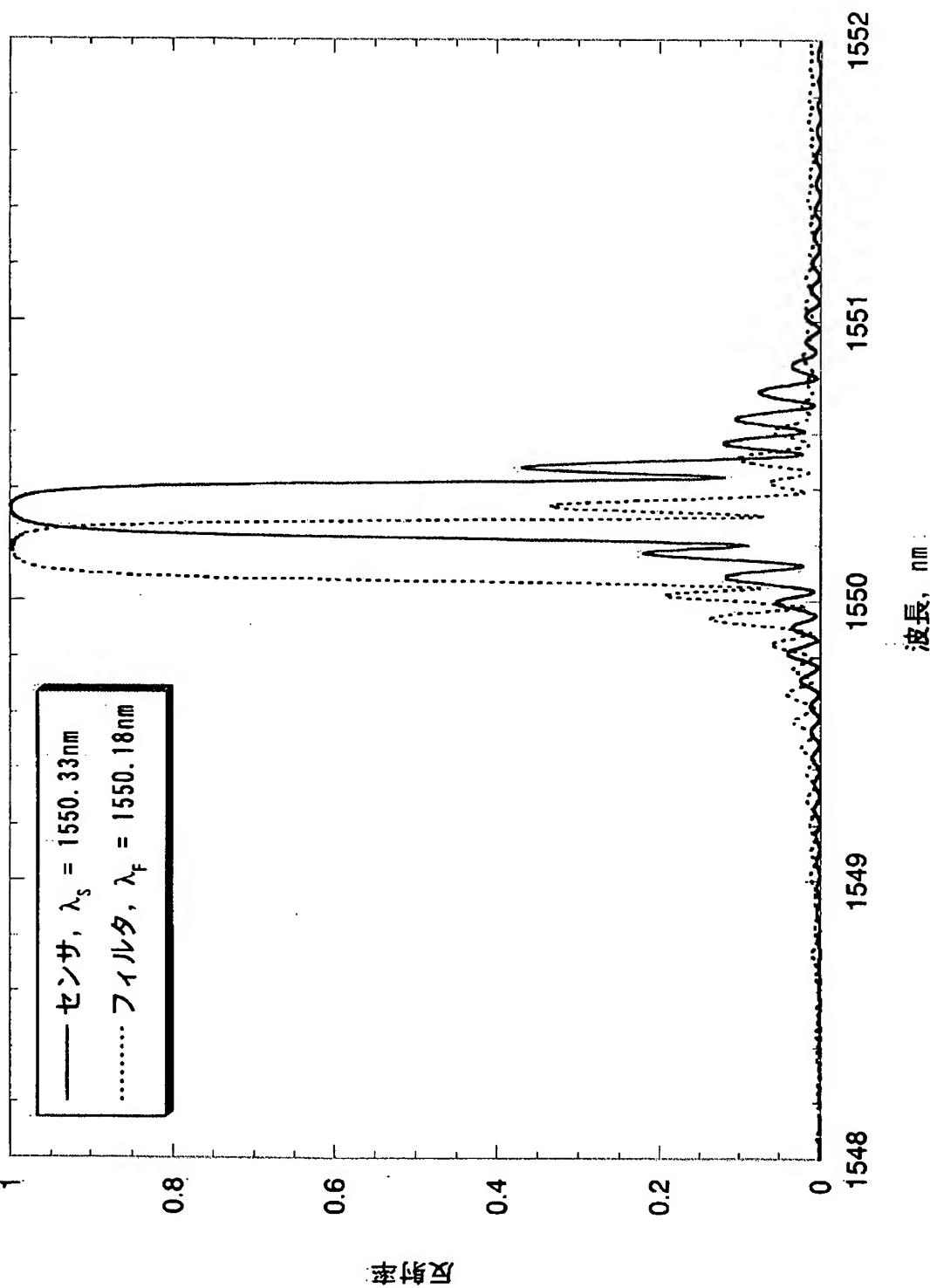


【図5】



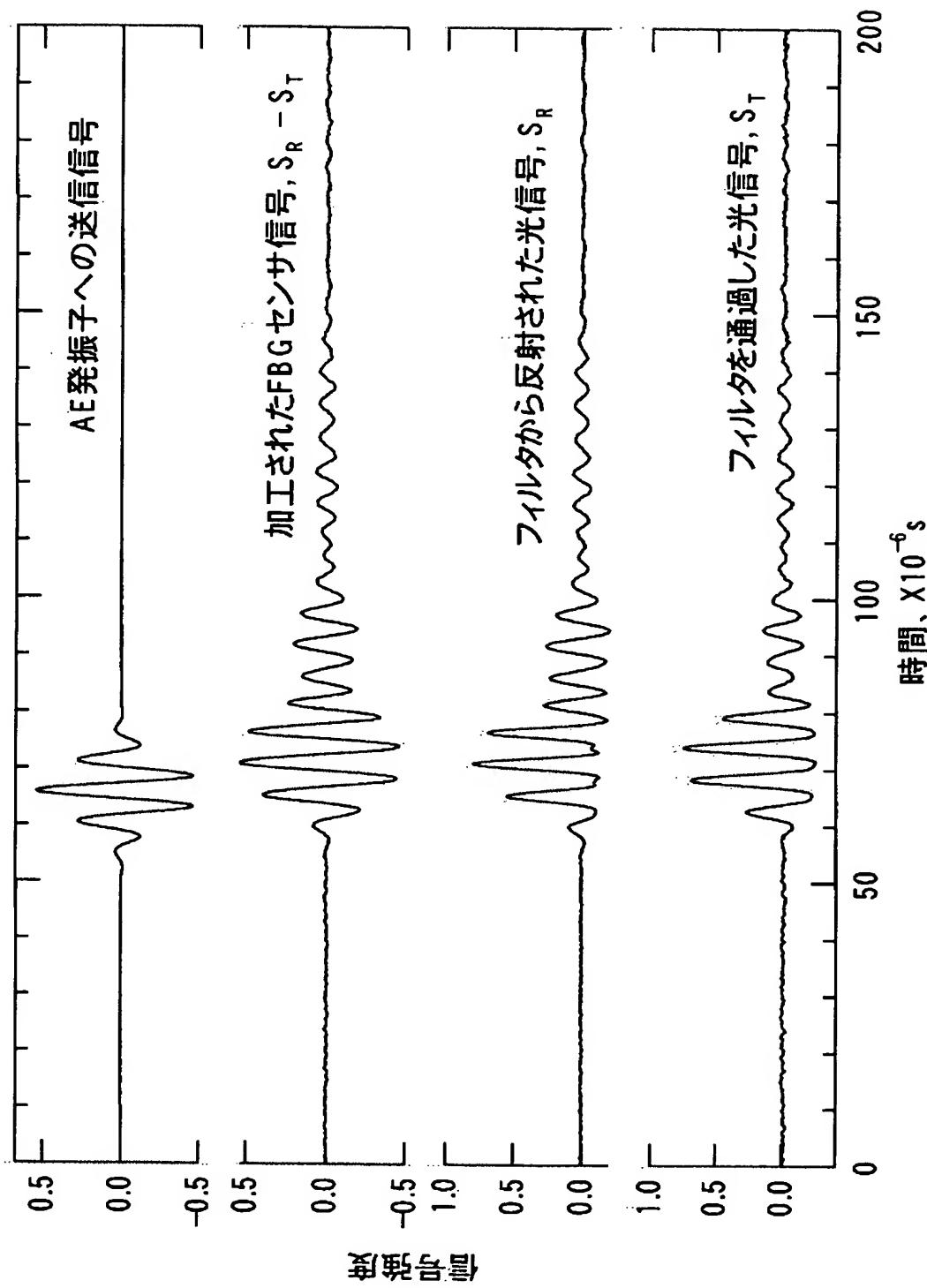
【図6】

FBGセンサヒルタの反射特性



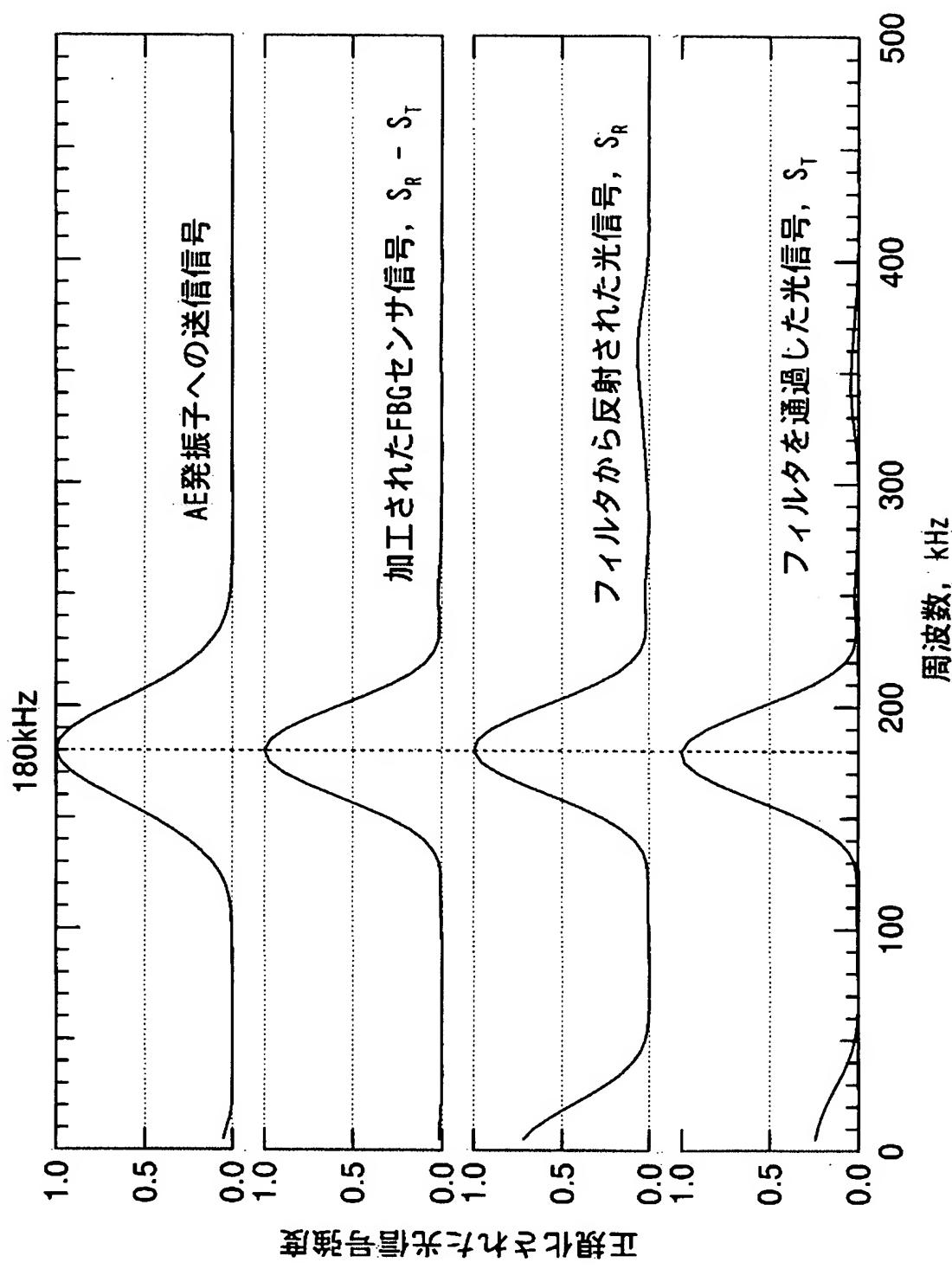
【図 7】

FBGセンサにより検出されたAE波形



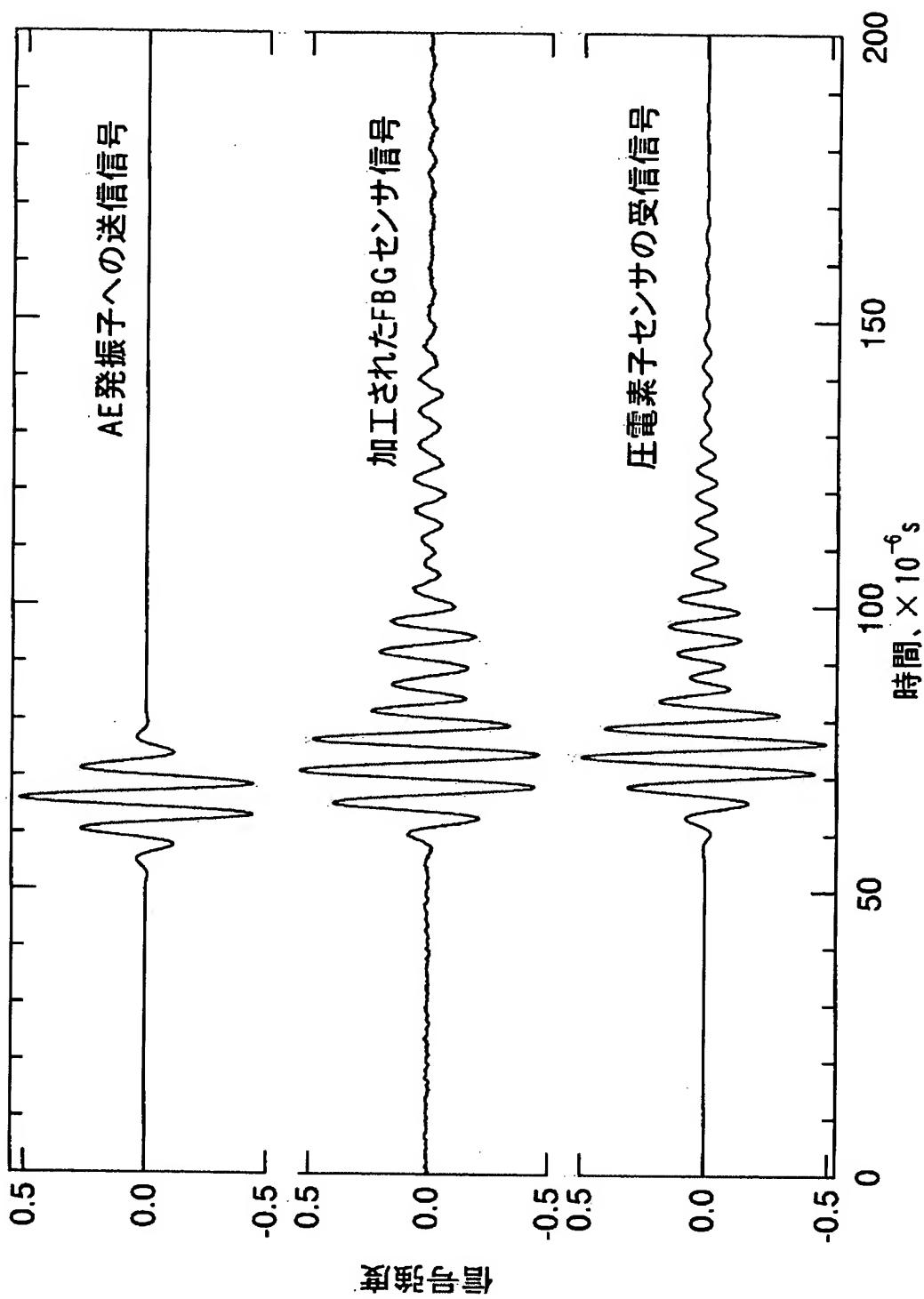
【図8】

FBGセンサが検出した信号の周波数成分強度

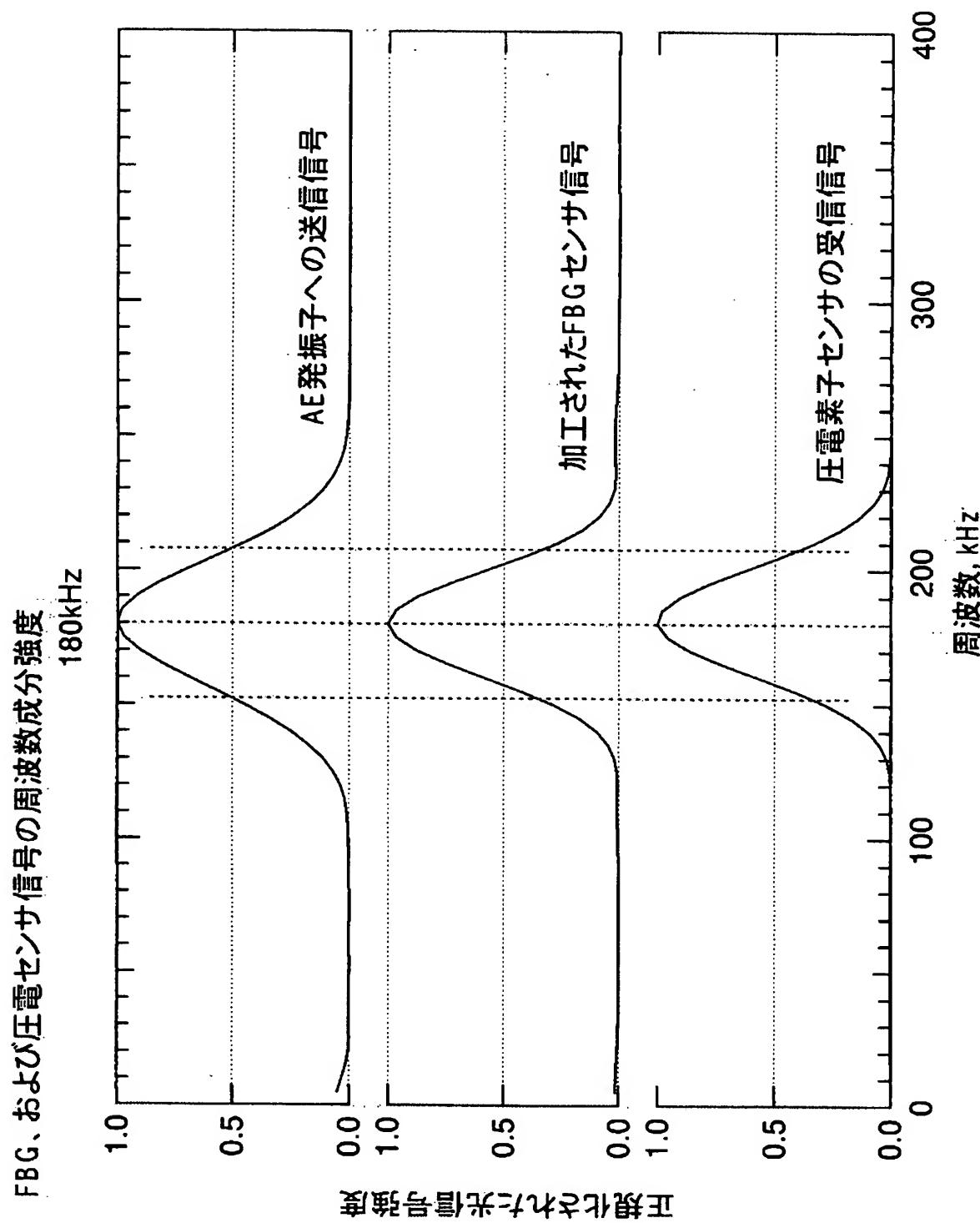


【図9】

AEに対するFBG、および圧電センサの応答の比較



【図10】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 正確なAE計測を可能とし、衝撃負荷による高速なひずみ変化の検出においても有効な光ファイバひずみセンサ装置及びひずみの検出方法を実現する。

【解決手段】 被検体15に取り付けられるFBGセンサ6と、FBGセンサ6に広帯域波長光を入射するための広帯域光源11と、FBGセンサ6で反射される反射光を反射又は透過させるFBGフィルタ9とを備えており、広帯域光源から入射され上記FBGセンサ6で反射される反射光の中心波長の変化をFBGフィルタ9で処理して検出する。

【選択図】 図5

認定・付加情報

特許出願の番号	特願2002-340197
受付番号	50201771021
書類名	特許願
担当官	第一担当上席 0090
作成日	平成14年11月26日

<認定情報・付加情報>

【提出日】	平成14年11月25日
-------	-------------

次頁無

特願2002-340197

出願人履歴情報

識別番号 [301021533]

1. 変更年月日 2001年 4月 2日

[変更理由] 新規登録

住所 東京都千代田区霞が関1-3-1
氏名 独立行政法人産業技術総合研究所